

MISTURAS DE SOLO-BORRACHA PARA ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES

SAND-RUBBER MIXTURES FOR VIBRATION ISOLATION

Rios, Sara; *CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal, sara.rios@fe.up.pt*

Viana da Fonseca, António; *CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal, viana@fe.up.pt*

Kowalska, Magdalena; *Department of Geotechnics and Roads, Silesian University of Technology (SUT), Gliwice, Poland, magdalena.kowalska@polsl.pl*

Kijanka, Małgorzata; *Department of Geotechnics and Roads, Silesian University of Technology (SUT), Gliwice, Poland, kijankoza@gmail.com*

RESUMO

A borracha de pneus usados é uma grande e problemática fonte de resíduos. Neste trabalho, foi abordada a possibilidade de se usar borracha triturada para isolamento de vibrações e mitigação de liquefação. Nesse sentido, foram executados ensaios triaxiais com bender elements e instrumentação interna para obter parâmetros de amortecimento e do módulo de distorção e a sua evolução ao longo do ensaio. Uma areia uniforme de Coimbra foi selecionada pelo facto de a sua caracterização já ser conhecida. A borracha proveniente de um produtor local foi triturada para ter granulometria menor que 0,8 mm permitindo provetes de 50 mm e 70 mm de diâmetro. Algumas amostras foram cortadas monotonicamente a 0,05 mm/min para se definir a envolvente de resistência enquanto outras foram cortadas ciclicamente. Os resultados mostraram que a adição de borracha à areia reduziu substancialmente o módulo de distorção o que favorece a mitigação das vibrações. Por outro lado, verificou-se que a borracha reduziu o potencial de liquefação do solo.

ABSTRACT

Scrap tyres are among the largest and most problematic sources of waste. In this paper, the possibility of using crumbed rubber for vibration isolation and liquefaction prevention was addressed. For that purpose, triaxial tests with bender elements and internal instrumentation were executed to obtain damping and shear stiffness parameters and their evolution with the strain increase. A uniform river sand from Coimbra (Portugal) was selected because the characterisation of the natural soil was already known. Crumb rubber from a local provider with grain dimensions lower than 0.8 mm was used, which allowed laboratory specimens of 50 mm or 70 mm in diameter. Some specimens were sheared monotonically at 0.05 mm/min to define the static strength envelope while others were sheared in cyclic tests. The results have shown that the addition of rubber to the sand has significantly decreased the shear stiffness which favours the mitigation of vibrations. In addition, the rubber reduced the soil liquefaction potential.

1 - INTRODUÇÃO

As vibrações são associadas a carregamentos cíclicos, induzindo vibrações que têm impactos em áreas densamente povoadas, que tendem a ser um fenómeno recorrente em zonas urbanas altamente infraestruturadas. Estas podem ser causadas por exemplo por tráfego elevado, obras geotécnicas (estacas cravadas, compactação de solos), eventos sísmicos e parasísmicos. Este último problema ocorre por exemplo na Polónia, embora o país como um todo seja considerado não sísmico. Quasi-sismos, causados por mineração profunda em minas de carvão e cobre, ocorrem em duas regiões: na bacia de carvão da Alta Silésia (GZW) na vizinhança de Katowice e Bytom, e no distrito de cobre de Legnica-Głogów (LGOM) próximo de Lubin e Polkowice, para oeste de Wrocław. Ambas estas áreas são bastante urbanizadas. A intensidade dos tremores parasísmicos pode atingir o grau VII na escala de Mercalli MSK e magnitude 4.5 na escala de Richter (Lipski and Wawrzynek, 2001). Embora estas vibrações usualmente não causem sérios danos em edifícios bem construídos, elas têm influencia negativa no bem-estar das populações. Assim, o desenvolvimento de uma solução de baixo custo para a proteção das infraestruturas contra as vibrações é importante. Para este efeito, uma solução prática podia ser o isolamento das fundações dos edifícios com "almofadas" preenchidas com material de elevado amortecimento como por exemplo, misturas de areia-borracha.

A fonte prática de borracha é atualmente a indústria automóvel e mais precisamente os pneus em fim de vida. De acordo com o EUROSTAT (<http://ec.europa.eu/eurostat>), nos últimos 15 anos o número de carros por habitante tem vindo a crescer, atingindo 0,45 carros por cidadão. Se assumirmos que cada conjunto de 4 pneus de um veículo é mudado a cada 2 anos, e que cada pneu pesa cerca de 8 kg, isto gera um uso anual de pneus (apenas de veículos ligeiros) de 274 000 toneladas na Polónia e 75 000 toneladas em

Portugal. Por outro lado, como referido na norma ASTM D 6270-98 (2004), os pneus que já não são usados devido ao seu uso ou dano, estão entre as maiores e mais problemáticas fontes de resíduos. O seu empilhamento foi proibido pela diretiva comunitária 1999/31/EC sobre o aterro de resíduos, por ocupar demasiado espaço, ser fonte de incêndio, e ter potencial para ser gerador de insetos. As mesmas características que tornam os pneus problemáticos (a sua durabilidade e disponibilidade em grande número, mas também a sua resiliência) torna-os atrativos para a reciclagem. No entanto, mais de metade dos pneus usados são queimados pelo seu valor combustível produzindo grandes quantidades de fumo tóxico. Há várias formas de utilizar os pneus usados em aplicações de engenharia civil, considerando as questões ambientais. Estas incluem o uso de agregados provenientes dos pneus (tire derived aggregate – TDA), e misturas de TDA/solo para enchimento de aterros, tardo de muros de suporte, camadas drenantes para estradas e outras aplicações, enchimento para isolamento térmico em edifícios, camadas para amortecimento de vibrações em linhas férreas, substituição de solos e rochas noutras aplicações. Possivelmente, o TDA pode também ser usado na mitigação de vibrações.

Este artigo apresenta resultados de investigação sobre a influência do teor de borracha nas misturas areia-borracha, em especial nas suas propriedades dinâmicas e cíclicas: módulo de rigidez e amortecimento. Foi também observado o potencial de liquefação neste material. Dois tipos de provetes (contendo 10% e 50% de granulado de borracha) foram testados em condições triaxiais. O plano experimental incluiu ensaios cíclicos para determinar a evolução do módulo de rigidez G e coeficiente de amortecimento D com a deformação de corte, e ensaios com ondas sísmicas por bender elements para estimar os valores elásticos dos módulos G_0 , M_0 e E_0 . Ensaio monotónicos foram também realizados para determinar os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.

2 - INVESTIGAÇÃO PRÉVIA EM MISTURAS DE SOLO-BORRACHA

Vários investigadores estudaram a influência do teor de borracha no comportamento de misturas areia-borracha. Em muitos desses casos os ensaios consideraram borracha triturada de forma mais grosseira (designada de acordo com a norma ASTM D 6270-98, 2004 por “tyre chips” ou “shreds” pelo facto da fração grossa ser maior que 12 mm) para ser usada em aterros, isolamento, ou camadas de drenagem, demonstrando a sua eficiência e aplicabilidade tanto à escala laboratorial como à escala natural (ex. Edil e Bosscher, 1994; Yoon et al., 2005; Moghaddas Tafreshi e Norouzi, 2012; Vinot e Baleshwar, 2013). Muito menos trabalhos reportam a mistura de areia com a fração fina de borracha triturada: granulada (0.425 – 2 mm) ou em pó (< 0.425 mm) – como a usada neste estudo.

Ghazavi (2004) misturou resíduos de mangueira de jardim triturada (1 ~ 5 mm) com areia uniforme ($D_{50} \approx 0.7$ mm) em várias proporções (0, 10, 15, 20, 50, 70, 100% em peso) e conduziu ensaios de corte direto para determinar a resistência do material. Foi observado um claro pico de resistência em todas as misturas exceto nos provetes de borracha simples. Todos apresentaram comportamento dilatante, mas a gama de deformações para a qual foi observado comportamento compressivo foi mais larga para amostras contendo mais borracha. Por outro lado, o comportamento dilatante nestes provetes foi menor. Nos provetes contendo borracha uma coesão aparente foi observada. Para uma dada tensão normal, a resistência de corte das misturas areia-borracha foi maior que a resistência da areia para o mesmo nível de compactação, especialmente em provetes contendo grandes percentagens de borracha. Ghazavi (2004) estimou que para um teor de borracha de 15% o ângulo de resistência ao corte ϕ' aumentou 13% para provetes soltos (de $31,2^\circ$ para $35,2^\circ$) e 1,6% para provetes ligeiramente mais densos (de 37° para $37,6^\circ$), embora o ângulo de resistência ao corte dos grãos de borracha seja igual a 31° , essencialmente associado ao atrito entre as partículas (ângulo de estado crítico, ϕ'_{cv}). De acordo com Ghazavi (2004) a adição de 10-20% de borracha para a areia é ótima porque a resistência ao corte dessas misturas resulta de dois fatores atuando simultaneamente: a pressão lateral induzida pelos grãos da areia contra as partículas de borracha e o atrito mobilizado entre todos as componentes.

Ensaio de corte direto similares foram realizados independentemente por Edinçliler et al. (2010) e Mohamad et al. (2013). O primeiro grupo observou um máximo aumento do ângulo de resistência ao corte, associado à resistência de pico para 20% de borracha de pneus (1-3 mm) com areia uniforme (de $38,7^\circ$ para $42,6^\circ$ – portanto 10%). O segundo grupo notou um máximo aumento desse ângulo de 5 a 15% (dependendo da densidade dos provetes) para 10% de borracha (1 – 4 mm) com areia de rio ($D_{50} = 0,8$ mm). Adicionalmente, Edinçliler et al. (2010) notou que a adição de borracha aumentou a rigidez do material para baixas deformações e diminuiu-a para maiores deformações.

Zheng-Yi e Sutter (2000) testaram misturas de granulado de borracha (2,0 – 4,75 mm) e areia de Ottawa (0,595 – 0,841 mm) num equipamento de coluna ressonante torsional. Os provetes de areia e borracha foram preparados por compactação com baixo teor em água (undercompaction method) e método de colocação a seco com colher (air dry hand-spooning method). Foram testados várias percentagens volumétricas de borracha: de 29% a 100%. Os autores demonstraram que o módulo de distorção normalizado (G/G_0) para misturas de areia-borracha reduziu com o aumento da deformação de corte de modo similar ao que acontece tipicamente em solos coesivos saturados. O aumento do teor de borracha

causou uma diminuição do módulo de distorção a baixas deformações G_0 e um aumento do coeficiente de amortecimento.

Anastasiadis et al. (2011) examinaram o módulo de distorção G_0 e o coeficiente de amortecimento D_{min} de misturas de solo-borracha secas e densas em ensaios de coluna ressonante. Foram testadas várias razões entre as dimensões das partículas de solo e de borracha (de 5:1 a 1:10) bem como diferentes teores de borracha (0 - 35% por peso de mistura). Os autores misturaram sete tipos de solos granulares com diferentes granulometrias ($D_{50} = 0,27 - 7,80$ mm e $C_u = 1,2 - 12,5$) com quatro tipos de borrachas de granulometria distinta ($D_{50} = 0.35 - 3.00$ mm). Os resultados revelaram que o módulo de distorção inicial G_0 diminuiu enquanto o coeficiente de amortecimento D aumentou com o teor de borracha. O granulado de borracha simples ($D_{50} = 2.80$ mm) exibiu aproximadamente 100 vezes menos módulo de distorção ($G_0 \approx 1$ MPa) e 10 vezes mais coeficiente de amortecimento ($D \approx 6 - 7\%$) em comparação com provetes de solo (Anastasiadis et al., 2009).

3 - MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

3.1 - Propriedades do solo e da borracha

3.1.1 - Areia de Coimbra

Neste trabalho, uma areia da região de Coimbra, foi usada no programa experimental. É uma areia de rio proveniente do rio Mondego e onde há relatos históricos da ocorrência de liquefação neste solo durante os sismos de Lisboa e Benavente em 1755 e 1909 respetivamente (Soares, 2015). O potencial de liquefação é previsível devido à sua granulometria uniforme (Figura 1) que resulta em coeficientes de uniformidade e curvatura próximos da unidade como indicado no Quadro 1. A Figura 2 mostra uma fotografia da areia obtida em microscópio ótico onde é claro que os grãos são arredondados como é esperado de uma areia de rio.

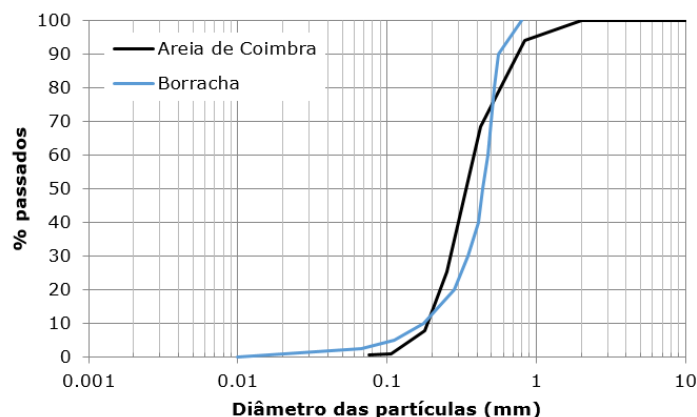


Figura 1 – Curva granulométrica da areia e da borracha



Figura 2 – Areia de Coimbra

Quadro 1 – Propriedades da areia de Coimbra

Densidade das partículas	2,653 g/cm ³
Índice de vazios mínimo	0,48
Índice de vazios máximo	0,81
Diâmetro médio (D ₅₀)	0,35 mm
Coefficiente de uniformidade (C _u)	1,6
Coefficiente de curvatura (C _c)	1,03

3.1.2 - Borracha triturada

O granulado de borracha tem dimensões entre 0 e 0,8 mm e foi fornecido pela empresa Biosafe (www.biosafe.pt) que procede à trituração mecânica de pneus em fim de vida. A curva granulométrica foi determinada de acordo com a norma CEN TS 14243 (CEN, 2010) e está apresentada também na Figura 1. A fração selecionada (com granulometria muito próxima da areia de Coimbra) permitiu a preparação de provetes muito homogêneos sem segregação. A densidade das partículas de borracha foi determinada por picnómetro de hélio e é igual a 1,15 g/cm³, portanto 2,3 vezes inferior à densidade da areia.

3.2 - Preparação das amostras

Neste estudo, duas misturas de areia com borracha foram testadas contendo 10% e 50% de borracha por peso de solo (massa da borracha/massa de areia*100)

A preparação das amostras seguiu o método do acondicionamento húmido (moist tamping method) porque é uma técnica fácil e rápida que não segrega as partículas de solo permitindo ao operador controlar a densidade final (Chang et al., 2011). Para além disso, já havia dados anteriores de ensaios da areia preparada por esta técnica com 5% de teor em água (Soares, 2015; Teixeira, 2015) que serviram de referência a este estudo.

Primeiro, o solo e a borracha foram misturados a seco até completa homogeneização e depois a água foi adicionada de forma a obter-se 5% de teor em água. A mistura assim preparada foi então colocada suavemente no molde (como se expressa na Figura 3) de forma a obter um estado muito solto, próximo do índice de vazios máximo da areia. Como os resultados anteriores na areia confirmaram o seu potencial de liquefação, estes ensaios permitiram também avaliar o efeito da borracha na mitigação da liquefação. Duas dimensões de amostras foram preparadas: 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e 70 mm por 140 mm respetivamente. Assim que o molde ficou cheio a placa de topo foi colocada e a membrana foi desenrolada e presa com dois 'o-rings'. Uma pequena pressão de vácuo correspondente à tensão efetiva inicial durante a saturação (10 kPa) foi então aplicada de forma a permitir a retirada segura do molde evitando o seu colapso. As dimensões finais dos provetes foram então medidas. Finalmente, a célula triaxial foi fechada e cheia com água para que a pressão interna do vácuo possa ser substituída pela pressão de confinamento do provete.

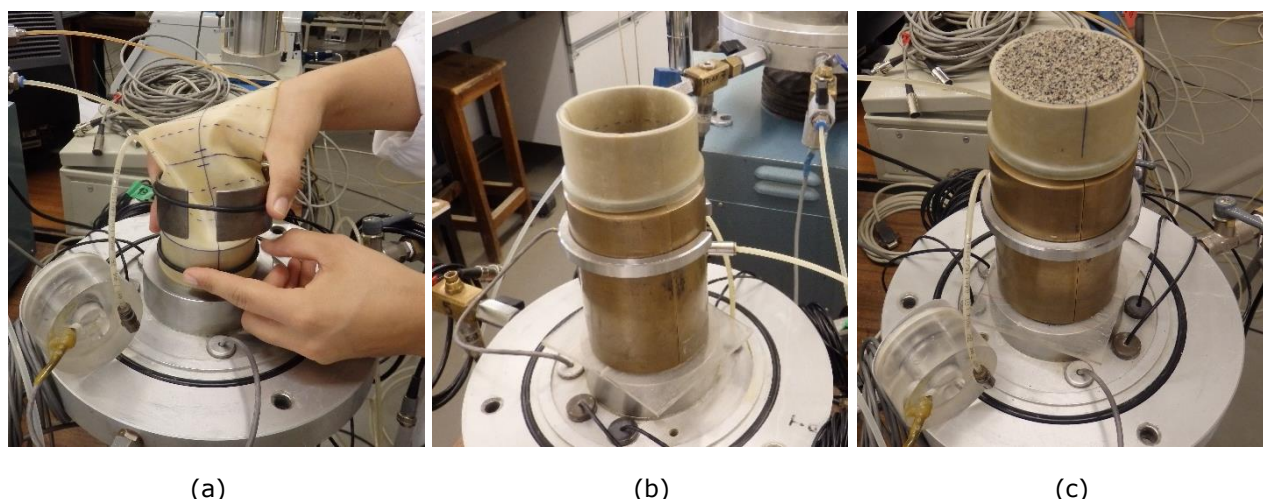


Figura 3 – Preparação dos provetes: a) fixação da membrana à base da célula com dois "o-rings"; b) ajuste da membrana ao molde; c) areia-borracha no molde

3.3 - Equipamento e procedimentos de ensaio

Depois da instalação do provete na célula triaxial, foi deixado percolar dióxido de carbono através do provete para facilitar a remoção do ar. De seguida, a percolação de água preparou a amostra para o estágio seguinte: saturação. Usando estes procedimentos preliminares, a saturação da areia foi bastante rápida e tanto a pressão na célula como no interior do provete puderam ser incrementadas simultaneamente com

uma velocidade de 30 kPa por cada 30 min mantendo uma tensão efetiva de 10 kPa. Quando a pressão na célula e no interior do provete atingiram 310 e 300 kPa respetivamente, o parâmetro B de Skempton foi medido e B=1 foi obtido.

Dois tipos de células triaxiais foram usados com diferentes objetivos. Uma célula stress-path do tipo Bishop-Wesley foi usada para executar ensaios cíclicos de baixa frequência de forma automática. Um carregamento sinusoidal em condições não drenadas foi então aplicado como se expressa na Figura 4. Os primeiros 10 ciclos foram executados com bastante baixa amplitude ($F_{\max} = 3 \text{ N}$) e de seguida nos 10 ciclos seguintes a máxima força foi duplicada. Este procedimento foi continuado até à rotura do provete. Como consequência, e sabendo que o sistema não podia aplicar uma velocidade variável da pressão do pistão, os primeiros ciclos eram muito mais rápidos que os últimos. No entanto, de acordo com Kokusho (1980) a velocidade de carga não tem efeito significativo nas propriedades dinâmicas das areias. O sistema equipado com instrumentação interna através de dois transdutores Hall-effect e com bender elements em forma de "T" na placa de topo e da base forneceram medições das velocidades das ondas sísmicas durante o ensaio. Estes ensaios foram realizados com 50 kPa de tensão efetiva isotrópica de confinamento. A carga foi medida através de uma célula de carga com 3 kN de capacidade. Foi também usado um transdutor externo com 50 mm de gama que forneceu medições dos deslocamentos do provete essenciais na última parte do ensaio quando os transdutores internos saíram da gama de leitura.

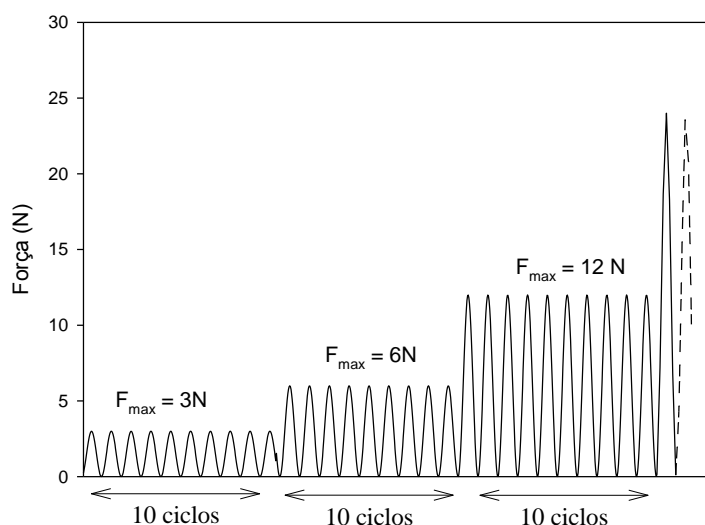


Figura 4 – Esquema do carregamento cíclico

Ao mesmo tempo, uma célula convencional do tipo Bishop-Henkel foi usada para realizar ensaios monotónicos em provetes similares. Nestes ensaios as misturas de solo com borracha foram consolidadas com 100 kPa e 200 kPa de tensão efetiva de confinamento, para serem depois cortadas em condições não drenadas num carregamento controlado em deslocamento com uma velocidade de 0,05 mm/min. Uma célula de carga externa de 5 kN de capacidade foi usada assim como um transdutor de deslocamento externo de 50 mm de gama.

O programa experimental está apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Plano experimental				
Nome do provete	% Borracha	Tensão efetiva de confinamento isotrópico (kPa)	Tipo de corte	Tipo de equipamento
CS_10_50	10%	50	cíclico	Célula stress-path com BE
CS_10_100		100	monotónico	Célula convencional com BE
CS_10_200		200	monotónico	Célula convencional
CS_50_50	50%	50	cíclico	Célula stress-path com BE
CS_50_100		100	monotónico	Célula convencional com BE
CS_50_200		200	monotónico	Célula convencional

Inicialmente, as misturas de areia com borracha foram preparadas para ter uma índice de vazios inicial de 0,8, próximo do índice de vazios máximo da areia, mas durante a preparação verificou-se que a presença da borracha impedia a compactação com este índice de vazios através da técnica do moist tamping. De facto, foi obtida uma mistura tanto mais solta quanto maior a percentagem de borracha. O Quadro 3 resume a informação relativa à fase de preparação dos provetes indicando a sua dimensão (altura H e diâmetro D), teor em água (w), peso volúmico (γ), peso volúmico seco (γ_d) e índice de vazios (e). O peso volúmico

das partículas sólidas foi calculado através da média ponderada entre a densidade das partículas de areia e de borracha. O teor em água e o índice de vazios durante o corte foram calculados através das condições do provete no final do corte (Quadro 3). Como o corte é não drenado estes parâmetros não se alteram pelo que o índice de vazios do corte pode ser obtido através do teor em água final com a seguinte equação:

$$e = \frac{G \cdot w}{S} \quad [1]$$

onde,

e é o índice de vazios final (assumido constante durante o corte)

G é a densidade relativa calculada por $G = \rho_s / \rho_w$, onde ρ_w é a densidade da água

w é o teor em água final (assumido constante durante o corte)

S é o grau de saturação, assumido igual a 1 (totalmente saturado)

Quadro 3 – Condições do provete durante a moldagem e corte

Nome do provete	γ_s (kN/m ³)	Condições do provete durante a moldagem						Condições durante o corte	
		H (mm)	D (mm)	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	w (%)	e
CS_10_50	24.51	107,895	48,9	4,56	12,85	12,29	0,99	32,26	0,81
CS_10_100		143,78	71,36	4,69	14,04	13,41	0,83	30,72	0,77
CS_10_200		140,53	69,3	4,845	12,99	12,39	0,98	30,44	0,76
CS_50_50	18.42	105,31	47,61	3,44	9,93	9,60	0,92	37,72	0,71
CS_50_100		103,6	48,49	2,52	9,73	9,49	0,94	27,72	0,52
CS_50_200		140,54	69,43	4,51	10,31	9,86	0,87	18,11	0,34

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Ensaios cíclicos

A interpretação dos ensaios cíclicos permite a análise do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento durante o ensaio. Seguindo a recomendação da norma japonesa JGS 0542-2000 (JGS, 2000), o módulo de distorção (G) e o coeficiente de amortecimento (D) foram calculados de acordo com a equação seguinte:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad [2]$$

$$D = \frac{A_{loop}}{2\pi A_\Delta} \quad [3]$$

onde as variáveis são descritas na Figura 5 e nas equações seguintes,

$$A_{loop} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \tau_{i+1}) \cdot (\gamma_i + \gamma_{i+1}) \quad [4]$$

onde i se refere a cada medição registada durante o ensaio.

$$A_\Delta = \frac{\Delta\tau \cdot \Delta\gamma}{4} \quad [5]$$

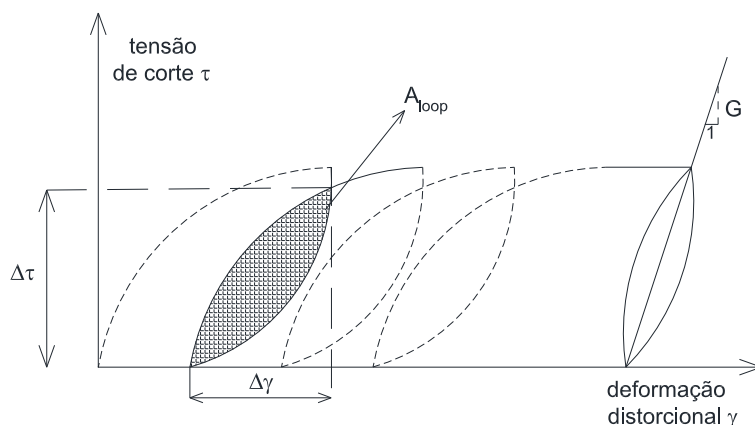


Figura 5 – Definição das variáveis para cálculo do módulo de distorção e coeficiente de amortecimento

Durante o corte triaxial não drenado a deformação de corte (γ) pode ser estimada como sendo 1,5 vezes a deformação axial ϵ_a (eq. 6) e a tensão de corte (τ) como metade da tensão de desvio q (eq. 7):

$$\gamma = 1,5 \epsilon_a \quad [6]$$

$$\tau = 0,5 q \quad [7]$$

onde $q = \sigma_v - \sigma_H$, σ_v – tensão vertical, σ_H – tensão horizontal.

Seguindo o carregamento cíclico da Figura 4, os provetes suportaram até cinco conjuntos de dez ciclos até a deformação ser considerada excessiva (superior a 20%). Os ciclos dos últimos conjuntos de ciclos foram muito mais bem definidos porque cargas mais elevadas significam deformações mais elevadas, que podem mais facilmente ser lidas pelos transdutores de deformação local (transdutores Hall-effect), enquanto que nos primeiros conjuntos de ciclos a deformação é muito pequena mesmo abaixo da resolução destes transdutores. A Figura 6 mostra um exemplo onde fica patente que no primeiro ciclo de carga (Figura 6 a) os pontos situam-se a $1 \cdot 10^{-5}$, a $2 \cdot 10^{-5}$, a $3 \cdot 10^{-5}$ ou a $4 \cdot 10^{-5}$ de deformação axial indicando que o transdutor não consegue ler valores abaixo de 10^{-5} . Pelo contrário, no último estágio o ciclo está muito mais bem definido (Figure 6 b).

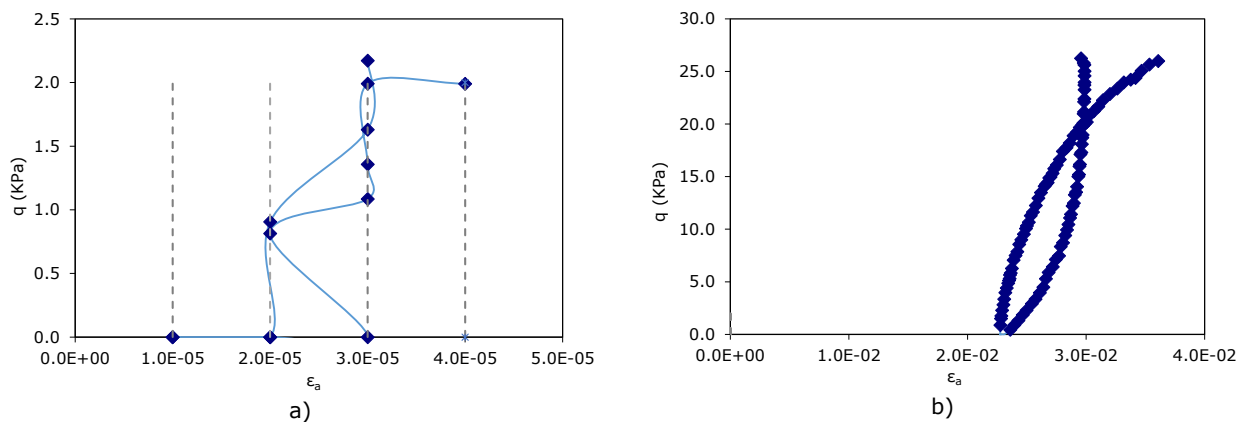


Figura 6 – A forma dos ciclos no ensaio do provete CS_10_50: a) primeiro estágio de carga; b) 5º estágio de carga

É sabido que durante um carregamento cíclico o módulo de rigidez tende a diminuir enquanto o amortecimento tende a aumentar devido à plastificação do solo e consequente aumento da deformação (e.g. Kokusho, 1980, Ishibashi e Zhang, 1993) o que foi verificado neste caso. Por outro lado, comparando os dois ensaios cíclicos da areia com 10% e 50% de borracha, é possível verificar que a adição de borracha reduz significativamente a rigidez do material aumentando a sua capacidade de absorver vibrações. No que diz respeito ao coeficiente de amortecimento, os valores não mostram uma tão significativa dependência da percentagem de borracha, o que pode ser explicado pelo facto do amortecimento ser mais sensível aos problemas indicados na Figura 6. Estes resultados são apresentados na Figura 7 para o módulo de distorção e coeficiente de amortecimento relativos ao 5º ciclo de cada conjunto de 10 ciclos.

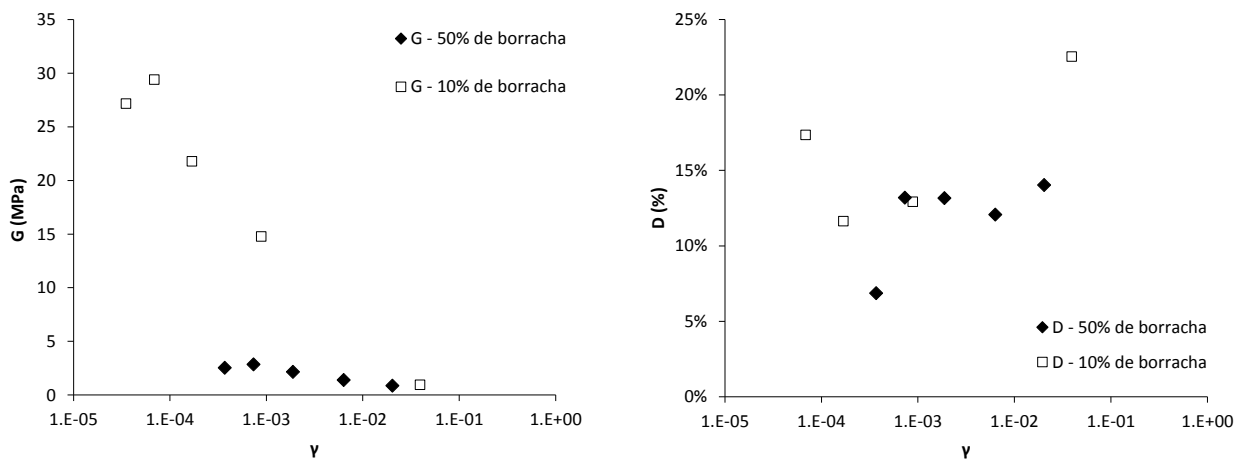


Figura 7 – Efeito da percentagem de borracha no: a) módulo de distorção, b) coeficiente de amortecimento

4.2 - Medição da velocidade das ondas sísmicas

O tempo de propagação das ondas de corte e compressão através de bender elements foi analisado no domínio do tempo através da metodologia descrita por Camacho-Tauta et al. (2015). Dividindo a altura do provete (que corresponde à distância entre os transdutores) pelo tempo de propagação das ondas S e P, as correspondentes velocidades podem ser determinadas. De acordo com a teoria da elasticidade, as velocidades das ondas de compressão e de corte (V_p and V_s) são relacionadas com o módulo confinado (M_0) e com o módulo de distorção (G_0) respetivamente através das equações (8) e (9),

$$M_0 = \rho V_p^2 \quad [8]$$

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad [9]$$

Onde ρ é a densidade do material. A equação (9) fornece o valor do coeficiente de Poisson (ν), através do qual o módulo de Young (E_0) pode ser calculado usando a equação (11).

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad [10]$$

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu) \quad [11]$$

O Quadro 4 apresenta os resultados da velocidade de propagação das ondas sísmicas e dos correspondentes módulos elásticos determinados para o final da consolidação. Como observado nos ensaios cíclicos, também o módulo de distorção reduz com o aumento do teor de borracha. Isto é consistente em condições dinâmicas e cíclicas e está de acordo com o obtido por Zheng-Yi e Sutter (2000) e Anastasiadis et al. (2011).

Quadro 4 – Resultados das ondas sísmicas no final da consolidação

Nome do provete	V_s [m/s]	V_p [m/s]	G_0 [MPa]	M_0 [MPa]	ν [-]	E_0 [MPa]
CS_10_50kPa	154,14	1541,36	31,11	3110,89	0,49	93,01
CS_10_100kPa	177,37	1709,58	41,61	3865,82	0,49	124,38
CS_50_50kPa	87,67	1796,46	7,48	3140,26	0,50	22,42
CS_50_100kPa	120,00	1711,17	14,23	2893,08	0,50	42,61

4.3 - Ensaios monotónicos

Num estudo anterior sobre a areia de Coimbra, Teixeira (2015) mostrou que esta areia tem potencial de liquefação. No entanto, as misturas de areia-borracha ensaiadas neste estudo não apresentam liquefação embora os seus índices de vazios fossem superiores ao índice de vazios da areia (Quadro 3). A Figura 8 apresenta as curvas tensão-deformação e de excesso de pressão neutra para esses ensaios. Observa-se que a tensão de desvio q aumenta continuamente mesmo para grandes deformações sem atingir qualquer pico, enquanto os excessos de pressão neutra aumentam até um certo ponto e depois começam a descer impedindo a liquefação. O mecanismo deste comportamento pode ser explicado da seguinte forma: a pressão de água nos poros do provete aumenta até ser suficientemente alta para conseguir afastar os grãos num provete de solo sem borracha, enquanto num provete de solo-borracha a pressão comprime a borracha levando ao endurecimento do material. Este comportamento pode ser identificado como liquefação limitada (pelo menos para os provetes com 10% de borracha) tal como referido por Castro (1975) para materiais com endurecimento e pequena dilatância após instabilidade – detalhes em Soares (2015). Isto também demonstra que borracha finamente triturada misturada com areia solta pode mitigar o problema da liquefação o que é consistente com os resultados obtidos para frações de borracha mais grosseiras publicados por Hyodo et al. (2007) ou Bahadori e Manafi (2013).

Na Figura 9 apresenta-se as trajetórias de tensão a partir das quais a linha de rotura foi definida. Os valores obtidos por estes dados revelam valores do ângulo de resistência ao corte próximos de 40° o que corresponde a valores de M ($M=q/p'$) de 1,6, que são certamente valores do ângulo de atrito no estado crítico para estas misturas sem componente dilatante. Estes valores são muito mais elevados dos que os obtidos anteriormente para a areia ($M=1,3$) por Teixeira (2015) o que pode ser explicado apenas pela presença da borracha que aumenta a resistência friccional.

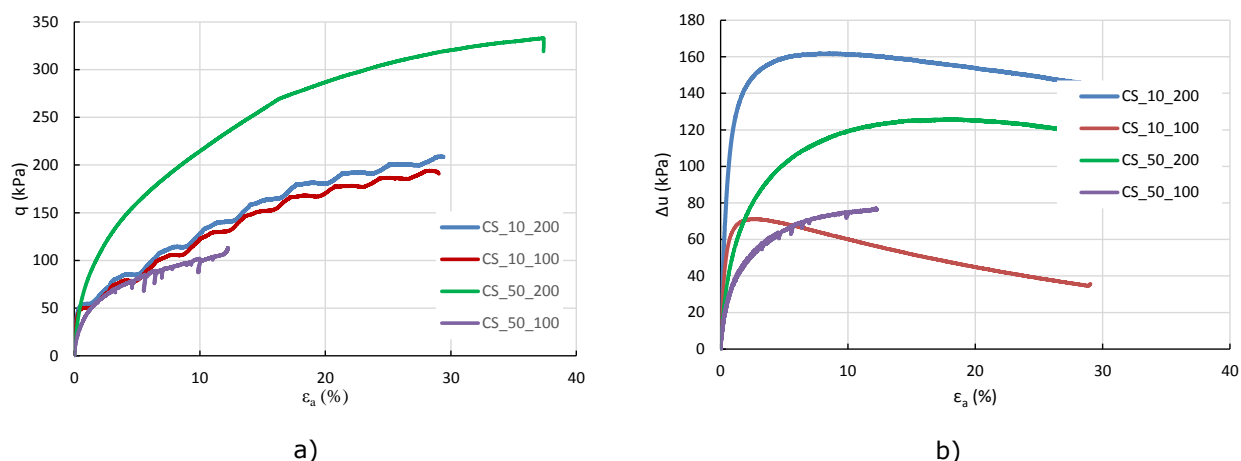


Figura 8 – Ensaio triaxiais em misturas de areia-borracha: a) curvas tensão-deformação; b) curvas do excesso de pressão de água nos poros

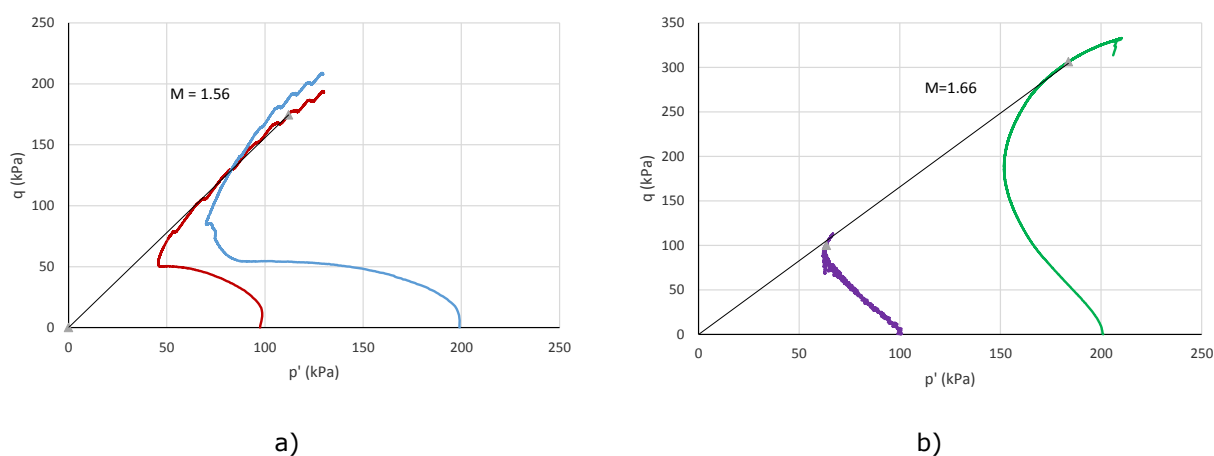


Figura 9 – Trajetórias de tensão nos ensaios monotônicos: a) areia misturada com 10% de borracha; b) areia misturada com 50% de borracha

5 - Conclusões

A borracha proveniente de pneus em fim de vida é um sério problema ambiental uma vez que ocupa muito espaço, tem possibilidade de atear incêndio e pode ser gerador de insetos. No entanto, as suas várias propriedades (durabilidade, disponibilidade em grande número, grande resiliência) são valiosas para várias aplicações de engenharia civil. Para além das aplicações identificadas na norma ASTM D 6270 (2012), as misturas de solo-borracha podem ser também usadas para mitigação de vibrações e de problemas de liquefação se as suas propriedades cíclicas e dinâmicas forem bem conhecidas. Neste trabalho, uma areia uniforme de Coimbra misturada com borracha triturada (0-0,8 mm) foi analisada por meio de ensaios triaxiais com bender elementares e transdutores de deformação local. Os resultados mostraram que a adição de borracha à areia reduziu significativamente o módulo de distorção o que favorece a mitigação de vibrações. Adicionalmente, a borracha impediu a liquefação do solo. Embora mais investigação seja necessária nestas misturas, este trabalho demonstrou que há vantagens em usar a borracha para a redução das vibrações e para impedir a liquefação. O próximo passo consiste em obter valores do coeficiente de amortecimento mais precisos tanto através das medições das ondas sísmicas como através de ensaios cíclicos de compressão-extensão. É também necessário definir, em colaboração com as empresas, a forma mais adequada de implementar estas técnicas in loco.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Biosafe o fornecimento da borracha triturada usada neste estudo, e o apoio financeiro do MCTES/FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia do Ministério da Ciência e Ensino Superior) na bolsa SFRH/BPD/85863/2012, co-financiada pelo Fundo Social Europeu do programa POCH, e no projeto CONSTRUCT (POCI-01-0145-FEDER-007457) financiado pelo COMPETE 2020.

REFERENCIAS

- Anastasiadis, A., Pitilakis, K., Senetakis, K. (2009). Dynamic shear modulus and damping ratio curves of sand/rubber mixtures. In: Proceedings of the Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference, XVIIth International Conference On Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt
- Anastasiadis, A., Senetakis, K., Pitilakis, K. (2011). Small-strain shear modulus and damping ratio of sand-rubber and gravel-rubber mixtures, *Geotechnical and Geological Engineering*, April 2012, Vol. 30, No. 2, pp. 363-382
- ASTM D 6270-98 (2004) Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications, ASTM International
- Bahadori, H., Manafi, S. (2013) Investigation of Sand-Tire Mixtures as Liquefaction Remedial Measure. *Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering: Building an Earthquake-Resilient Pacific*, 6-8 November 2015, Sydney, Australia, pp. 883-886
- Camach-Tauta, J., Cascante, G., Viana da Fonseca, A., Santos, J.A. (2015). Time and frequency domain evaluation of bender elements systems. *Géotechnique*, Vol. 65, No. 7, pp. 548-562
- Castro, G. (1975). Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 101, GT6, pp. 551-569
- CEN (2010). TS 14243 - Materials produced from end of life tyres - Specification of categories based on their dimension(s) and impurities and methods for determining their dimension(s) and impurities. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles
- Chang, N., G. Heymann, and C. R. I. Clayton. (2011). The effect of fabric on the behaviour of gold tailings, *Géotechnique*, Vol. 61, No. 3, pp. 187-197
- Edil, T. B., Bosscher, P. J. (1994). Engineering properties of tire chips and soil mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 453-464
- Edinçliler, A., Baykal, G., Saygili, A. (2010). Influence of different processing techniques on mechanical properties of used tires in embankment construction. *Waste Management*, Vol. 30, pp. 1073-108
- Ghazavi, M. (2004) Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 22, pp. 401-416
- Hyodo, M., Yamada, S., Orense, R.P., Okamoto, M., and Hazarika, H. (2007). Undrained Cyclic Shear Properties of Tire Chip-Sand Mixtures, *Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges*, Hazarika and Yasuhara Eds., Taylor and Francis, UK.
- Ishibashi I., Zhang X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1, pp. 182-191
- JGS (2000). JGS 0542-2000 – Method for cyclic triaxial test to determine deformation properties of geomaterials. The Japanese Geotechnical Society
- Kokusho T. (1980). Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 2, pp. 45-60
- Lipski Z., Wawrzynek A. (2001). Numerical effort analysis of buildings with paraseismic loading supported with measurements. 1st International Scientific Seminar 'New Trends in Statics and Dynamics of Buildings', Seminar proceedings, Slovak University of Technology, Bratislava, December 2001, pp. 155 - 160.
- Moghaddas Tafreshi, S.N., Norouzi, A.H. (2012) Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire - An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 547-556
- Mohamad E.T., Latifi N., Marto A., Moradi R. (2013) Effects of Relative Density on Shear Strength Characteristics of Sand-Tire Chips Mixture, *EJGE*, vol. 18, Bund. D
- Soares, S. (2015). *Evaluation of soil liquefaction potential based on laboratory data. Major factors and limit boundaries*. PhD thesis, FEUP
- Teixeira, S. (2015). Evaluation and modelling of sandy soil behavior in terms of liquefaction potential. MSc thesis submitted to Faculty of Engineering of the University of Porto (in Portuguese).
- Vinot V., Baleshwar S. (2013) Shredded tyre-sand as fill material for embankment applications. *Journal of Environmental Research and Development*, Vol. 7, No. 4A, April - June 2013, pp. 1622-1627
- Yoon, S., Prezzi, M., Siddiki, N. Z., Kim, B. (2005) Construction of test embankment using sand-tire shred mixture as fill material. *Waste Management*, Vol. 26, 1033 - 1044
- Zheng-Yi, F., Sutter, K. G. (2000) Dynamic properties of granulated rubber-sand mixtures, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 23, No. 3, September 2000, pp. 338-344